

---

# Rapport modèles de biofouling

ST – Bioingénierie : produire, protéger, réparer

*Equipe No. 3*

---

Tristan NOUETTE  
Joan-Rufin TOUKAP NGUEPTEO  
Alexis PRIN  
Farhan ZAVERI

5 février 2024

# Résumé

Ce projet permet de travailler sur un cas concret du travail de l'ingénieur. Il s'agit ici d'étudier le phénomène de biofouling, omniprésent dans les centrales nucléaires françaises. L'objectif est de proposer des solutions aux problèmes de perte d'efficacité énergétique liés au dépôt d'un biofilm dans les tuyaux de l'échangeur du circuit secondaire de la centrale. Un modèle mathématique est simulé pour visualiser l'évolution de l'épaisseur de biofilm et de la température dans les tuyaux sur un cas d'étude Nebot et al. Le code a donc été validé sur un toy problem. Ce modèle est ensuite adapté pour correspondre aux différents cas d'étude proposés par EDF et permet de déterminer le nombre de tuyaux nécessaires dans l'échangeur. Les simulations montrent qu'une eau plus chaude impose davantage de tubes dans l'échangeur. En général, une eau plus chaude est plus contraignante et entraîne des coûts importants, liés au développement plus rapide du biofilm et une difficulté plus importante à évacuer la chaleur.

# Table des matières

<b>Liste de Symboles</b>	<b>1</b>
<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Modélisation</b>	<b>3</b>
1.1 Système . . . . .	3
1.2 Hypothèses . . . . .	3
1.3 Équations du modèle . . . . .	4
1.3.1 Facteur cinétique . . . . .	4
1.3.2 Résistances thermiques . . . . .	4
1.3.3 Loi de <i>Nebot</i> . . . . .	4
1.3.4 Équations thermiques . . . . .	4
1.3.5 Bilan . . . . .	5
<b>2 Simulation du modèle et résolution du Toy Problem</b>	<b>6</b>
2.1 Implémentation du modèle . . . . .	6
2.1.1 Conditions limites . . . . .	6
2.1.2 Paramètres . . . . .	6
2.1.3 Méthode d'Euler(schéma explicite) . . . . .	6
2.2 Résultats . . . . .	7
2.2.1 Test de sensibilité : impact de la discrétisation spatiale et temporelle . . . . .	7
2.2.1.1 Test de sensibilité : impact de la discrétisation spatiale . . . . .	7
2.2.1.2 Test de sensibilité : impact de la discrétisation temporelle . . . . .	7
2.2.2 Détermination de la valeur de $e_\infty$ via $R_\infty$ . . . . .	7
2.2.3 Ajustement (fitting) la valeur de $k_{25}$ par les données de [2]. . . . .	8
2.2.4 Impact de $e_0$ , de $k_{25}$ et $E$ . . . . .	9
2.2.4.1 Impact de $e_0$ . . . . .	9
2.2.4.2 Impact de $k_{25}$ . . . . .	10
2.2.4.3 Impact de $E$ . . . . .	10
2.2.5 Explication physique, dynamique et de l'établissement du régime permanent des graphes de $T$ et $e$ . . . . .	11
2.3 Discusison sur le modèle . . . . .	12
<b>3 Traitement des cas EDF</b>	<b>13</b>
3.1 Rappel des attendus du client . . . . .	13
3.2 Explication méthodologie pour déterminer le nombre de tubes . . . . .	13
3.2.1 Puissance thermique dissipée par un tube de refroidissement . . . . .	13
3.2.2 Puissance électrique nécessaire au pompage . . . . .	13
3.3 Impacts Sanitaires et Environnementaux sur le refroidissement en circuit ouvert . . . . .	13
3.3.1 Impacts Environnementaux [3] . . . . .	13
3.3.1.1 Eaux Froides De Mer . . . . .	13
3.3.1.2 Eaux de Rivière . . . . .	14
3.3.2 Impacts Sanitaires . . . . .	14
3.3.2.1 Eaux Froides de Mer . . . . .	14
3.3.2.2 Eaux de Rivière . . . . .	14
3.4 Cas d'étude 1 : mer . . . . .	14
3.4.1 Scénario 0 : Fictif . . . . .	14
3.4.2 Scénario 1 : Maintenance de l'échangeur . . . . .	15
3.4.3 Scénario 2 : Utilisation de biocides . . . . .	16

3.4.4	Scénario 3 : Encrassement total . . . . .	17
3.5	Cas d'études 2 : en rivière . . . . .	18
3.5.1	Scénario 0 : Fictif . . . . .	18
3.5.2	Scénario 1 : Maintenance de l'échangeur . . . . .	19
3.5.3	Scénario 1 bis : Tubes plus courts . . . . .	20
3.5.4	Scénario 2 : Utilisation de biocides . . . . .	24
3.5.5	Scénario 3 : Encrassement total . . . . .	25
3.6	Étude des KPI . . . . .	27
<b>Conclusion</b>		<b>29</b>
	Conclusion sur les résultats proposés . . . . .	29
	Perspectives . . . . .	29
	Ecologie . . . . .	29
	Echangeur . . . . .	29
	Fonctionnement de la centrale nucléaire . . . . .	29
	Règlementation . . . . .	29
<b>Annexes</b>		<b>30</b>
	Annexe 1 : fiche objectif . . . . .	31
	Annexe 2 . . . . .	32
<b>Bibliographie</b>		<b>33</b>

# Liste de symboles

## Nomenclature

- $r_i$  : rayon interne du tube de refroidissement. ( $m$ )  
 $e$  : épaisseur du biofilm. ( $m$ )  
 $e_\infty$  : épaisseur maximale du biofilm. ( $m$ )  
 $e_0$  : épaisseur initiale du biofilm. ( $m$ )  
 $R_{propre}$  : résistance du tube sans biofilm (constante). ( $m^2 K/W$ )  
 $R_{bio}$  : résistance du biofilm. ( $m^2 \cdot K/W$ )  
 $E$  : énergie d'activation. ( $J/mol$ )  
 $k_{25}$  : constante de vitesse à 25 °C. ( $W/m^2 K s$ )  
 $R$  : constante des gaz parfaits. ( $8.314 J/(mol K)$ )  
 $\lambda_{bio}$  : conductivité thermique du biofilm. ( $W/m/K$ )  
 $T_{ext}$  : température de la surface extérieure du tube. ( $K$ )  
 $T$  : Température de l'eau. ( $K$ )  
 $T_{entre}$  : Température de l'eau à l'entrée du tube. ( $K$ )  
 $D_m$  : débit massique de l'eau. ( $kg/s$ )  
 $c_p$  : capacité massique de l'eau. ( $J/kg/K$ )  
 $\Delta T$  : variation de température de l'eau entre la sortie et l'entrée du tube de refroidissement ( $K$ )  
 $\rho$  : masse volumique de l'eau. ( $kg/m^3$ )

# Introduction

## Contexte

Cette étude s'inscrit dans une démarche de l'ingénieur chez EDF.

Une centrale nucléaire nécessite un système de refroidissement de la vapeur d'eau du circuit secondaire. Le circuit de refroidissement peut-être ouvert, semi-fermé ou fermé. L'étude porte ici sur un circuit ouvert. Les installations en circuit ouvert ont un besoin important en eau, puisée dans un cours d'eau ou une mer. Cette eau va ensuite circuler dans un condenseur qui va permettre la condensation de la vapeur en eau liquide. Ce condenseur doit évacuer une quantité importante d'énergie. Une perte en efficacité constituerait de lourdes pertes économiques pour l'entreprise.

## Objectif du travail (cf. 3.6)

L'objectif de notre étude réside dans le dimensionnement d'un réseau d'échangeurs permettant d'évacuer 20MW de flux de chaleur à tout instant. Pour cela, un modèle sera développé à partir de l'étude du modèle Nebot [2]. Une simulation sera ensuite réalisée sur Python à partir de ce modèle. Le code sera alors validé grâce au toy problem. Il s'agira enfin d'adapter notre code aux différents cas d'étude proposés par EDF. Le tout devra respecter des normes sanitaires et environnementales. Il sera de rigueur de vérifier la pertinence de nos résultats d'un point de vue économique par l'analyse de KPI.

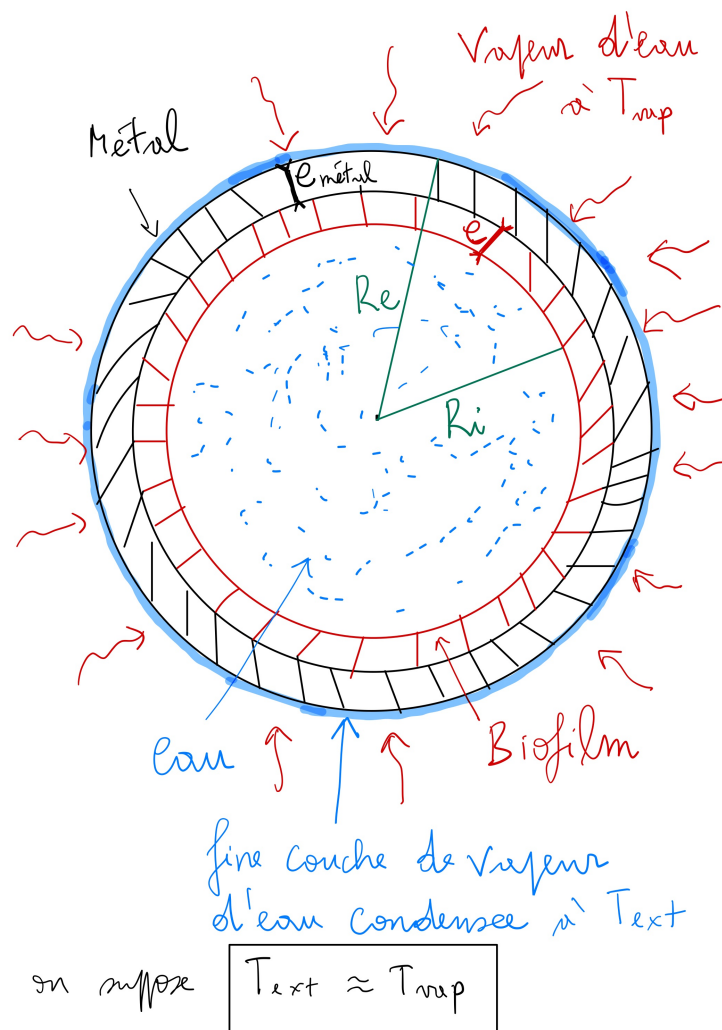
# Chapitre 1

## Modélisation

On présentera ici le développement du modèle associé notre étude de biofouling. Il s'agira tout d'abord de présenter le système considéré, puis les hypothèses formulées pour l'étude et enfin d'établir les équations régissant le modèle.

### 1.1 Système

Le système étudié est un tube de refroidissement en acier de longueur  $L$ , dans lequel circule de l'eau. Le tube est placé dans un environnement constitué de vapeur d'eau et le tube est entouré d'un film sur lequel se condense une fine épaisseur d'eau condensée. On étudiera la formation de biofilm à l'intérieur de ce tube.



### 1.2 Hypothèses

Plusieurs hypothèses doivent être formulées pour établir notre modèle :

- Le tube isolé est représentatif de l'ensemble des tubes et tous les tubes sont indépendants les uns des autres ;
- L'épaisseur de biofilm et la température de l'eau dans le tube sont couplées (néanmoins, le temps caractéristique de mise en place du profil de température a un temps caractéristique (env. 2,1 s) bien différent du temps caractéristique de la mise en place du biofilm (env. 40j)) ;
- Le biofilm se forme de manière lisse, de telle sorte que son épaisseur  $e(t)$  est constante en tout point d'une section ;
- Il n'y a pas de transfert thermique par rayonnement ;
- La température de la vapeur à l'extérieur des tubes est constante ;
- On considère l'épaisseur de la couche de biofilm très petite devant le rayon du tube :  $e(t) \ll r_i$
- Les épaisseurs de la pellicule d'eau condensée et de l'acier du tube sont petites devant  $r_i$  (les rayons sont proches).

## 1.3 Équations du modèle

### 1.3.1 Facteur cinétique

Le facteur cinétique  $k$  de croissance de biofilm est supposé suivre une loi de type Arrhenius :

$$k(T) = k_{25} \exp\left(\frac{-E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right) \quad (1.1)$$

### 1.3.2 Résistances thermiques

La résistance totale du système s'écrit :

$$R_{tot} = R_{bio} + R_{propre} \quad (1.2)$$

où  $R_{propre}$  est la résistance thermique constante du système ([tube en acier + eau à l'intérieur + eau condensée]), sans le biofilm. Aussi, on a l'expression suivante pour la résistance thermique du biofilm  $R_{bio}$  :

$$R_{bio} = \frac{r_i}{\lambda_{bio}} \ln \left( \frac{R_{bio,ext}}{R_{bio,int}} \right) \quad (1.3)$$

En supposant  $r_i \gg e$ , on obtient l'expression de  $R_{bio}$  :

$$R_{bio} = \frac{r_i}{\lambda_{bio}} \ln \left( \frac{r_i}{r_i - e} \right) \approx \frac{e}{\lambda_{bio}} \quad (1.4)$$

### 1.3.3 Loi de Nebot

En remplaçant les expressions de  $R_{bio}$  et de  $k$  dans la loi de Nebot ( $\frac{dR_{bio}}{dt} = k(R_\infty - R) \cdot R$ ) [2], on obtient :

$$\frac{de}{dt} = \frac{k(T)}{\lambda_{bio}} (e_\infty - e) \cdot e \quad (1.5)$$

### 1.3.4 Équations thermiques

Dans notre étude, on a supposé que  $T$  ne dépend que de  $z$  et du temps  $t$ .

$$T = T(z, t) \quad (1.6)$$

Si on applique le principe industriel à un élément de tube infinitésimal situé entre  $z$  et  $z + dz$  il vient :

$$D_m \cdot \delta h = P_{th}$$

$$D_m \cdot c_p \cdot (T(z + dz) - T(z)) = \Phi_{th}$$

$$D_m \cdot c_p \cdot (T(z + dz) - T(z)) = \frac{T_{ext} - T(z)}{R_{tot}} \cdot 2\pi r_i dz$$

$$D_m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dz} = \frac{(T_{ext} - T(z))}{\frac{e}{\lambda_{bio}} + R_{propre}} \cdot 2\pi r_i \quad (1.7)$$



### 1.3.5 Bilan

Finalement, le modèle de biofilm se réduit aux trois équations couplées 1.8, et 1.9 suivantes :

$$\boxed{\frac{de}{dt} = \frac{k(T)}{\lambda_{bio}}(e_{\infty} - e) \cdot e \quad \text{avec} \quad k(T) = k_{25} \exp\left(\frac{-E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right)} \quad (1.8)$$

$$\boxed{D_m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dz} = \frac{(T_{\text{ext}} - T(z))}{\frac{e}{\lambda_{bio}} + R_{propre}} \cdot 2\pi r_i} \quad (1.9)$$

## Chapitre 2

# Simulation du modèle et résolution du Toy Problem

On présentera ici l'approche choisie pour notre simulation, ses résultats et la résolution du Toy Problem à partir des valeurs de [2].

### 2.1 Implémentation du modèle

#### 2.1.1 Conditions limites

En premier lieu, on considère qu'à l'instant initial ( $t = 0$ ), le tube comporte une épaisseur  $e_0$  de biofilm, et qu'en tout instant, l'entrée du tube ( $z = 0$ ) est à la température  $T_{entre}$ . Cela donne les conditions limites suivantes :

$$\forall t, T(z = 0, t) = T_{entre} \text{ et } \forall z, e(z, t = 0) = e_0 \quad (2.1)$$

Leurs influences sur les résultats de simulation du modèle seront abordées plus loin.

#### 2.1.2 Paramètres

On réalise les simulations du modèle avec les valeurs de paramètres suivantes :

Paramètre	Valeur avec Unité	Paramètre	Valeur avec Unité
$r_i$	6 mm	$c_p$	4184 J/kg/K
L	3,1 m	$\dot{E}$	40 kJ/mol
$R_{propre}$	$510^{-4}$ m/W/K	$R$	8.314 J/mol/K
$D_m$	0.5 kg/s	$T_{ext}$	333.15 K
$\lambda_{bio}$	0.6 W/m/K		

#### 2.1.3 Méthode d'Euler(schéma explicite)

On choisit d'implémenter la simulation de notre modèle par une méthode d'Euler. Tout d'abord, on introduit les deux fonctions  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ , pour formaliser nos équations différentielles :

$$\frac{de}{dt} = \Phi_1(T, e) = \frac{k_{25}}{\lambda_{bio}} \exp\left(-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,5}\right)\right) (e_\infty - e) \cdot e \quad (2.2)$$

$$\frac{dT}{dz} = \Phi_2(T, e) = \frac{(T_{ext} - T(z))}{\frac{e}{\lambda_{bio}} + R_{propre}} \cdot \frac{2\pi r_i}{D_m c_p} \quad (2.3)$$

Ainsi, en discrétisant le temps par un pas  $dt$  et les distances selon  $z$  par un pas  $dz$ , on peut dresser le schéma d'Euler explicite suivant, qui sera implémenté sur Python :

$$e[z + 1, t] = e[z, t] + \Phi_1(T[z, t], e[z, t]) \cdot dt \quad (2.4)$$

$$T[z, t + 1] = T[z, t] + \Phi_2(T[z, t], e[z, t]) \cdot dz \quad (2.5)$$

## 2.2 Résultats

### 2.2.1 Test de sensibilité : impact de la discrétisation spatiale et temporelle

#### 2.2.1.1 Test de sensibilité : impact de la discrétisation spatiale

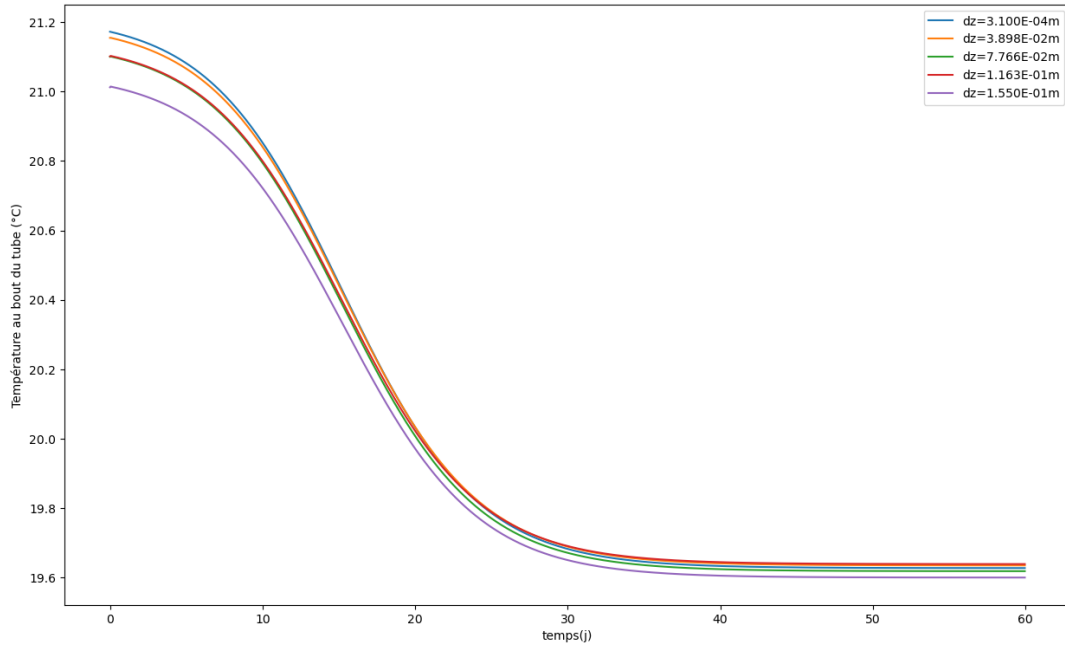


FIGURE 2.1 – Sensibilité de la température au bout du tube pour différents pas de discrétisation spatiale

La figure 2.1 montre une dépendance de la température au pas de discrétisation spatiale. Les tracés convergent pour un pas de discrétisation spatiale plus fin que  $dz = 4 \cdot 10^{-2}m$ . On retiendra alors dans le cas de notre discrétisation :

$$dz = 3 \text{ cm}$$

#### 2.2.1.2 Test de sensibilité : impact de la discrétisation temporelle

La figure 2.2 montre une dépendance de la température au pas de discrétisation temporelle. Les tracés convergent pour un pas de temps plus fin que  $dt = 6 \text{ jours}$ . On retiendra alors dans le cas de notre discrétisation :

$$dt = 1 \text{ heure}$$

### 2.2.2 Détermination de la valeur de $e_{\infty}$ via $R_{\infty}$

A partir des données du tableau ci-dessus, il est possible de déterminer la valeur de  $R_{\infty}$  correspondant à notre modèle. On travaille pour un pourcentage de vitesse de l'eau de 100%. A cette vitesse est associée la valeur de  $R_{\infty}$  correspondante. On trouve alors :

$$R_{\infty} = 0.346 \text{ m}^2 \cdot K \cdot kW^{-1}$$

On peut alors déterminer la valeur de  $e_{\infty}$  à partir de la valeur de  $R_{\infty}$  par la relation :

$$e_{\infty} = \lambda_{bio} \cdot R_{\infty}$$

On trouve alors :

$$e_{\infty} = 207,6 \mu m$$

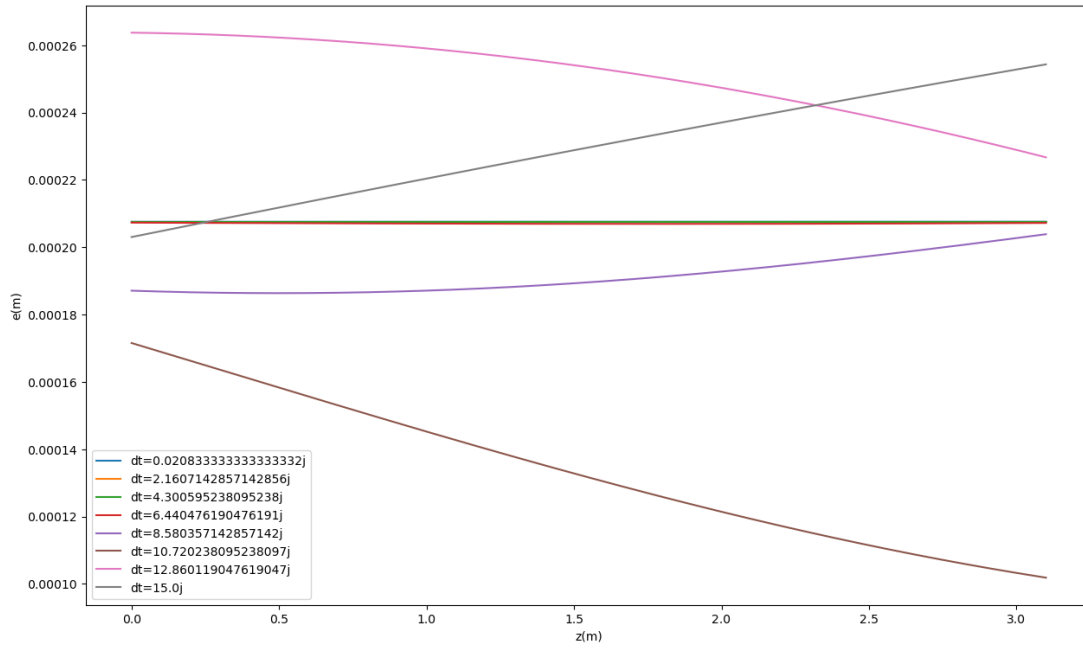


FIGURE 2.2 – Sensibilité de la température au temps final pour différents pas de discrétisation temporelle

Kinetic and statistical parameters of the proposed model resulting from experiments carried out with different flow velocities

% of velocity (respect 1.85 m/s)	$R_{f\infty}$ ( $m^2 K/kW$ )	$k$ ( $kW/m^2 K d$ )	$t_{1/2}$ (days)	$\sum(Pred - Obs)^2$	$r^2$
84	0.340	0.564	30.41	0.311	0.768
100	0.346	0.542	31.16	0.378	0.755
132	0.284	0.657	30.32	0.145	0.849
163	0.171	1.270	23.66	0.047	0.855

FIGURE 2.3 – valeurs des paramètres cinétiques et statistiques tirés d'expériences par [2]

### 2.2.3 Ajustement (fitting) la valeur de $k_{25}$ par les données de [2].

Le graphe 2.4 représente l'épaisseur de biofilm en fonction du temps pour différentes valeurs de  $k_{25}$ . On cherche alors la valeur de  $k_{25}$  qui se rapproche le plus des données de [2].

On procède pour cela par ajustement et on observe des résultats proche des données de [2] pour :

$$k_{25} = 0,009 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$$

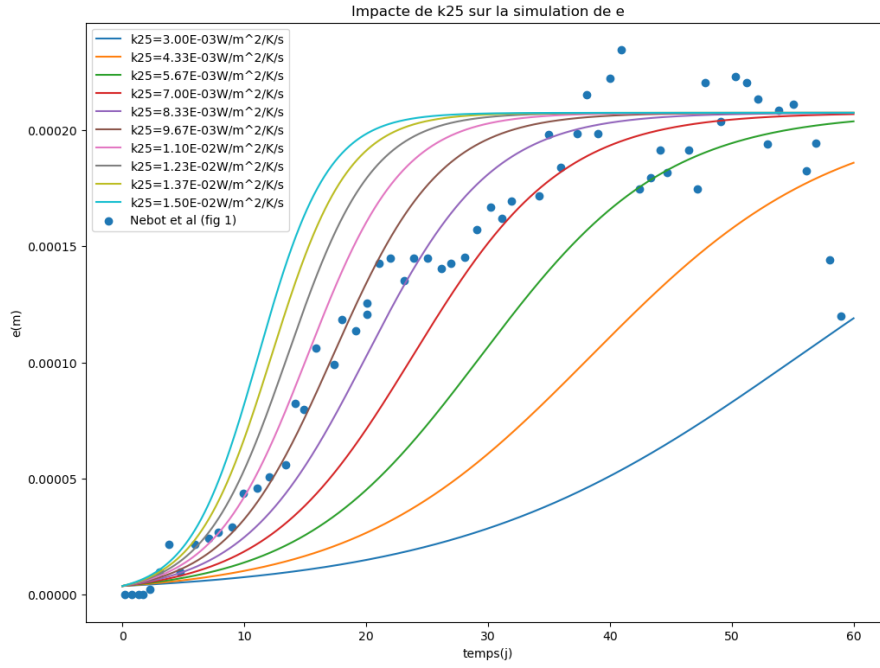


FIGURE 2.4 – moyenne spatiale de  $e(t)$  pour différentes valeurs de  $k_{25}$  avec  $E = 25 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $e_0 = 3.75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

## 2.2.4 Impact de $e_0$ , de $k_{25}$ et $E$

### 2.2.4.1 Impact de $e_0$

On rappelle l'équation obtenue en 1.3.3 à partir de la formule de *Konak* :

$$\frac{de}{dt} = \frac{k_{25}}{\lambda_{bio}} \exp \left( -\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298,5} \right) \right) (e_{\infty} - e) \cdot e \quad (2.6)$$

Les deux seuls points d'équilibre de  $e$ , c'est-à-dire où la dérivée de  $e$  s'annule, sont 0 et  $e_{\infty}$ .

Si  $e_0$  vaut 0 ou  $e_{\infty}$ , par résolution de l'équation différentielle ci-dessus, l'épaisseur  $e$  sera une constante égale à  $e_0$ , et donc on aura aucune évolution de celle-ci.

Si  $e_0$  est trop proche de 0, la croissance de la courbe à l'instant initiale sera très faible. De même, si  $e_0$  est très éloignée de 0, la croissance de la courbe à l'instant initiale sera trop rapide. La difficulté réside donc à bien choisir une valeur de  $e_0$  suffisamment éloignée de 0 qui permette d'assurer une croissance adéquate de  $e$ . Sur le tracé de la figure 2.5 ci-dessous avec différentes valeurs de  $e$ , la courbe *verte* satisfait assez bien ces conditions. On a donc retenu pour ce modèle :

$$e_0 = 3.75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

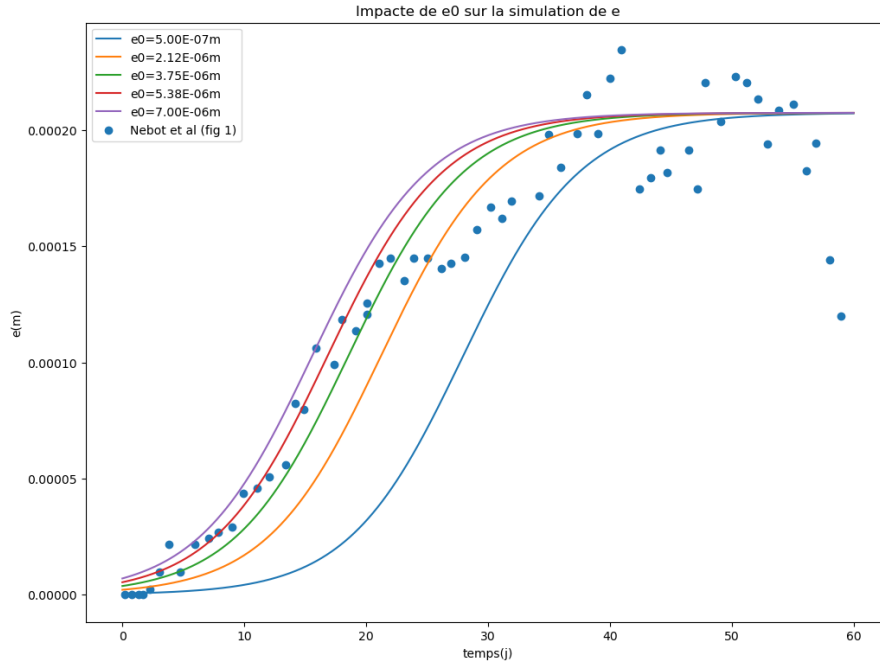


FIGURE 2.5 – moyenne spatiale de  $e(t)$  pour différentes valeurs de  $e_0$  avec  $k_{25} = 0,09W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$  et  $E = 25kJ \cdot mol^{-1}$

#### 2.2.4.2 Impact de $k_{25}$

A partir des tracés de la figure 2.4 de l'épaisseur  $e(t)$  de biofilm pour différentes valeurs de  $k_{25}$ , on remarque que  $k_{25}$  a une influence sur la raideur de la pente. Plus sa valeur est faible et plus la courbe est écrasée, et inversement.

#### 2.2.4.3 Impact de $E$

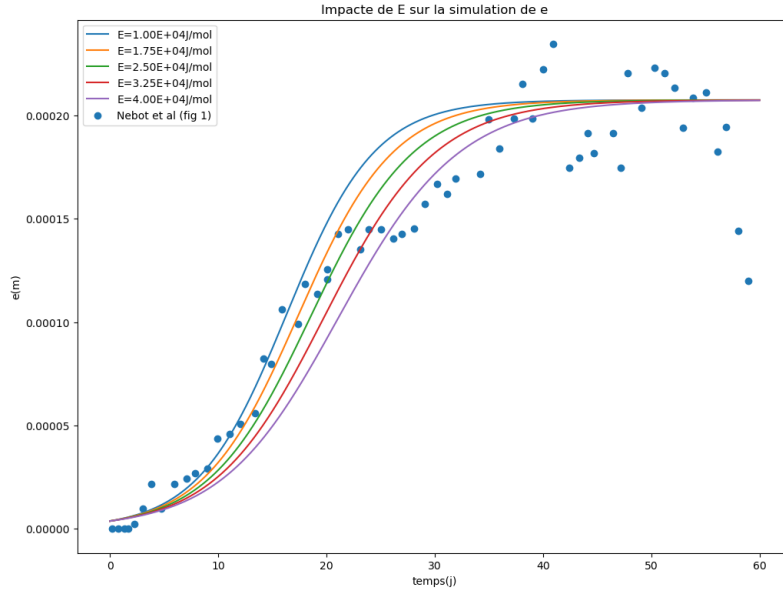


FIGURE 2.6 – moyenne spatiale de  $e(t)$  pour différentes valeurs de  $E$ , avec  $k_{25} = 0,009W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$ , et  $e_0 = 3.75 \cdot 10^{-6} m$

Sur la figure 2.6, le tracé des courbes pour différentes valeur de  $E$  permet de visualiser son impact sur l'évolution de l'épaisseur  $e(t)$  de biofilm au cours du temps.  $E$  est un paramètre qui influe sur la vitesse de convergence de l'épaisseur vers sa valeur  $e_\infty$ . Plus  $E$  est petite, plus  $e(t)$  converge rapidement vers son asymptote  $e_\infty$ , et c'est l'inverse que l'on observe lorsque  $E$  devient grand.

Ainsi,  $E$  est un paramètre de réglage de la sensibilité de la courbe, et connaître la tendance de son influence sur  $e(t)$  permet de régler notre modèle. On choisit alors, par fitting avec les valeurs tirés de [2] la valeur de  $E$  :

$$E = 25 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

### 2.2.5 Explication physique, dynamique et de l'établissement du régime permanent des graphes de $T$ et $e$

On procède par itérations successives dont la démarche est la suivante :

- On regarde le profil de température pour une épaisseur de biofilm initiale non nulle ;
- On détermine alors la croissance du biofilm pour ce profil de température ;
- Au pas de temps suivant, on recalcule le profil de température pour cette nouvelle épaisseur de biofilm ;
- On réitère la démarche jusqu'au temps d'établissement du biofilm, soit de 60j.

Les tracés obtenus s'expliquent de la manière suivante :

- L'eau est plus froide au début du tuyau qu'à la fin donc le biofilm aura une croissance plus importante à la fin du tuyau ;
- Plus l'épaisseur de biofilm sera importante et moins la différence de température aux deux extrémités du tuyau sera importante. Ceci engendrera alors une croissance moins rapide du biofilm.

Il y a deux régimes permanents selon ce qu'on étudie :

- au bout de quelques secondes, le régime permanent est atteint pour le gradient de température dans le tuyau. Il y a alors une indépendance de la température au temps ;
- après plusieurs jours (environ 60 jours), le régime permanent est établi pour l'épaisseur du biofilm qui atteint une épaisseur maximale et constante tout au long du tube.

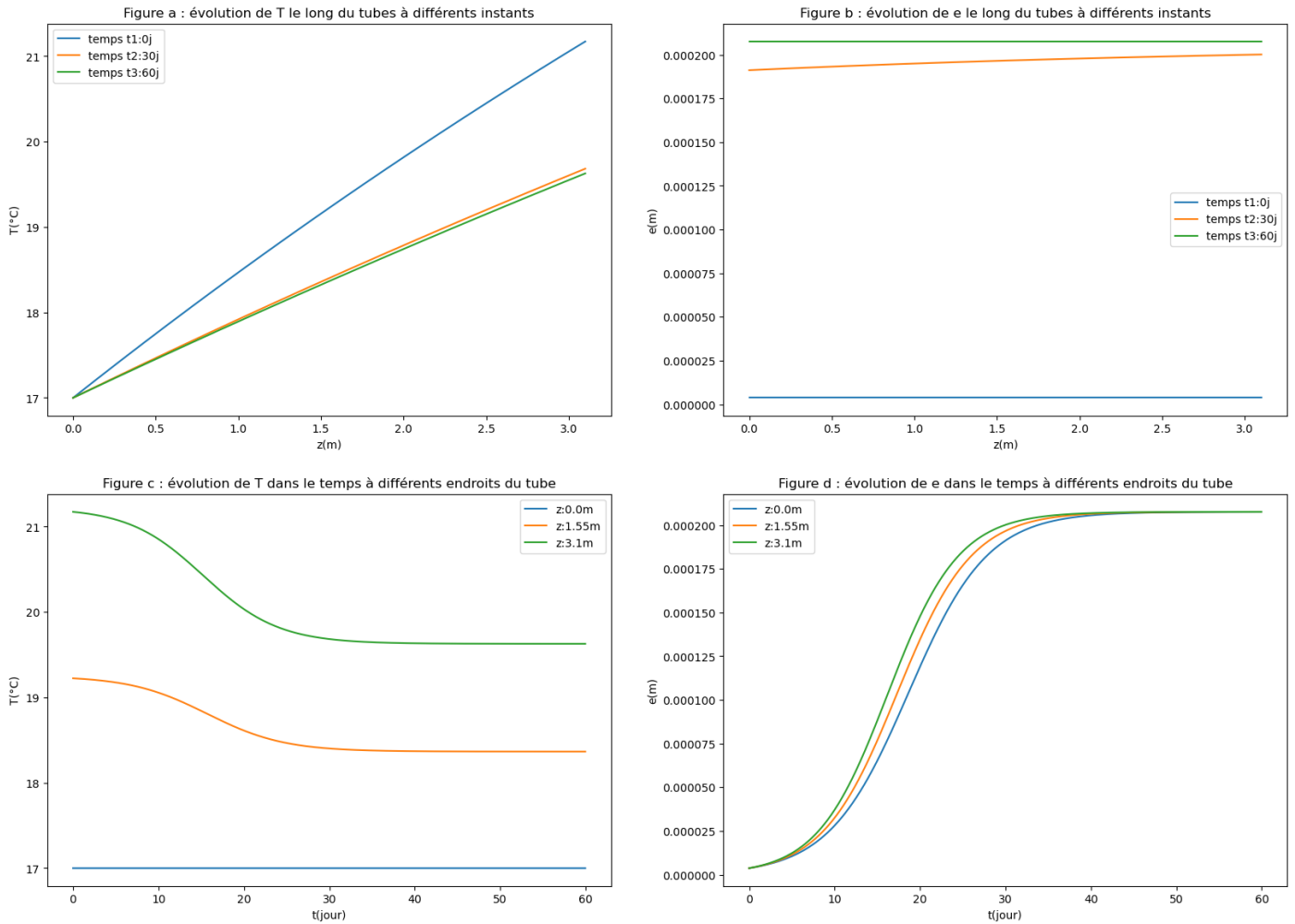


FIGURE 2.7 – Résultats obtenues pour  $e$  et  $T$  en fonction de  $z$  et  $t$  pour les paramètres choisis.

## 2.3 Discusison sur le modèle

Il est nécessaire d'avoir une prise de recul vis-à-vis du modèle que l'on a établi. Celui-ci se base sur des hypothèses simplificatrices, et l'objectif est surtout de proposer une première approche descriptive du phénomène de biofouling. En effet, on souhaite avant tout étudier les cas proposés par le client et chiffrer économiquement les différents scénarii. On ne cherche pas à avoir un modèle de précision, mais plutot un modèle descriptif, dont les valeurs obtenues ont des tendances et des ordres de grandeurs cohérents.

Aussi, le réglage des paramètres est basé sur l'étude [2], dans laquelle est utilisée de l'eau de mer dont la température est comprise entre 15°C et 19°C. Cette eau possède une biologie propre à elle, et l'eau d'une source différente aurait surement des micro-organismes bien différents. Dès lors, les paramètres qui ont été déterminés précédemment ne sont pas forcément les memes pour une eau d'une autre source, dont la biologie serait différente.



# Chapitre 3

## Traitement des cas EDF

### 3.1 Rappel des attendus du client

Dans cette étude, il faudra proposer une surface d'échange (d'un ou plusieurs échangeurs) permettant d'évacuer un flux thermique de 20 MW à tout instant. En outre, il s'agira de dimensionner notre installation en respectant scrupuleusement ce critère.

Il s'agira dans un même temps de considérer 2 mises en situation pour la réalisation de ce projet :

- le circuit ouvert est alimenté par une eau de mer salée à 12°C ;
- le circuit ouvert est alimenté par une eau de rivière à 25°C.

Pour chaque mise en situation, il sera de rigueur de traiter plusieurs cas (deux cas extrêmes et des cas intermédiaires) pour proposer une grande variété de solutions au client.

Enfin, un bilan technico-économique et une analyse de KPI seront réalisés pour rendre compte de la capacité du client à pouvoir appliquer ces solutions. Ce bilan s'appuiera sur les formules en 3.6.

### 3.2 Explication méthodologie pour déterminer le nombre de tubes

#### 3.2.1 Puissance thermique dissipée par un tube de refroidissement

D'après le premier principe industriel comme appliqué dans la partie 1, on obtient l'expression de la puissance thermique absorbée par l'eau dans un tube de refroidissement :

$$P_{th} = c_p D_m (T_{ext} - T_{entree}) = c_p D_m \Delta T \quad (3.1)$$

Cette équation nous permettra de vérifier à chaque instant que nos résultats sont cohérents avec la contrainte fixée par le client ("évacuer un flux thermique de 20MW"). Aussi, on peut en déduire le nombre minimum de tubes nécessaires pour évacuer un tel flux thermique :  $N_{tube} = \frac{P_{tot}}{P_{th}}$ .

#### 3.2.2 Puissance électrique nécessaire au pompage

On considère des pertes de charge lors de l'écoulement de l'eau dans le tube qui correspondent à :

$$\Delta P = \Lambda \frac{L}{d} \frac{V \rho}{4r_i} \quad (3.2)$$

où  $\Lambda$  vaut :

$$\Lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (3.3)$$

et  $Re$  vaut :

$$Re = \frac{2r_i V \rho}{\mu} \quad (3.4)$$

Soit, finalement, en notant  $\epsilon$  le rendement de la pompe électrique, on a l'expression de la puissance de pompage :

$$P_{pompe} = \frac{Q \Delta P}{\epsilon} \quad (3.5)$$

### 3.3 Impacts Sanitaires et Environnementaux sur le refroidissement en circuit ouvert

#### 3.3.1 Impacts Environnementaux [3]

##### 3.3.1.1 Eaux Froides De Mer

- Le rejet d'eau dans la mer est limité à une différence de température par rapport à l'entrée d'environ **15°C** ;
- La température de rejet de l'eau ne doit pas excéder **30°C** ;

- Le rejet de microorganismes pathogènes n'est pas impactant du fait du grand volume d'eau dans la mer (grande dilution des agents pathogènes dans le milieu).

#### 3.3.1.2 Eaux de Rivière

- En été, la sécheresse entraîne la diminution du débit d'eau de la rivière, ce qui limite les débits d'eau que peut prélever la centrale pour son refroidissement ;
- Le rejet d'eau dans la rivière est limité à une température maximale d'environ  $5^{\circ}\text{C}$  supplémentaires par rapport à la température d'eau en entrée ;
- La présence de biocide peut aseptiser la rivière et détruire l'écosystème aquatique (la concentration du biocide rejeté ne doit pas excéder  $0,2\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) ;

### 3.3.2 Impacts Sanitaires

Les impacts sanitaires concernent majoritairement la santé de l'homme.

#### 3.3.2.1 Eaux Froides de Mer

- Pas d'impact causé par les agents pathogènes du fait du volume d'eau dans la mer.

#### 3.3.2.2 Eaux de Rivière

- L'ajout de biocide va voir un impact positif du point de vue sanitaire puisqu'il va participer à l'élimination des agents pathogènes ;
- Impact négatif des agents pathogènes : développement de bactéries comme les **légiennelles** et les **d'amibes** qui peuvent causer chez l'homme des maladies neuro-dégénératives.

## 3.4 Cas d'étude 1 : mer

Dans cette partie, on considérera que l'eau qui circule dans le tube est une eau de mer froide. On présentera différents scénarios de gestion du problème de biofilm.

### 3.4.1 Scénario 0 : Fictif

Il s'agit du cas idéal où les tubes de l'échangeur restent propres. Dans ce cas le dimensionnement est effectué en supposant qu'il n'y a pas de biofilm formé et que la dissipation est optimale. Ce cas fictif permet d'obtenir le coût minimal de l'installation. Les figures sont tracées avec **400 tubes**.

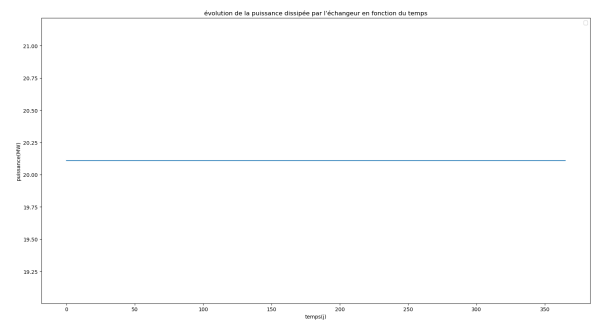
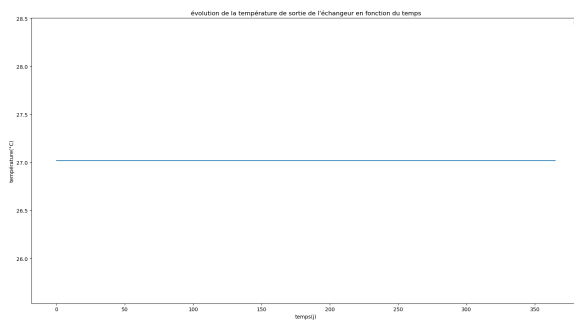


FIGURE 3.1 – Evolution de la température  $T$  au cours du temps

FIGURE 3.2 – Evolution de la puissance dissipée  $P_{th}$  au cours du temps

### 3.4.2 Scénario 1 : Maintenance de l'échangeur

Dans ce cas, l'échangeur s'encrasse au cours du temps. Dès lors la puissance qu'il dissipe diminue, et dès que cette puissance dissipée atteint **20 MW**, l'échangeur est mis à l'arrêt pour maintenance pendant 24h, et remplacé par l'échangeur additionnel. Puis au bout de 24h l'échangeur nouvellement propre reprend la place de l'échangeur additionnel.

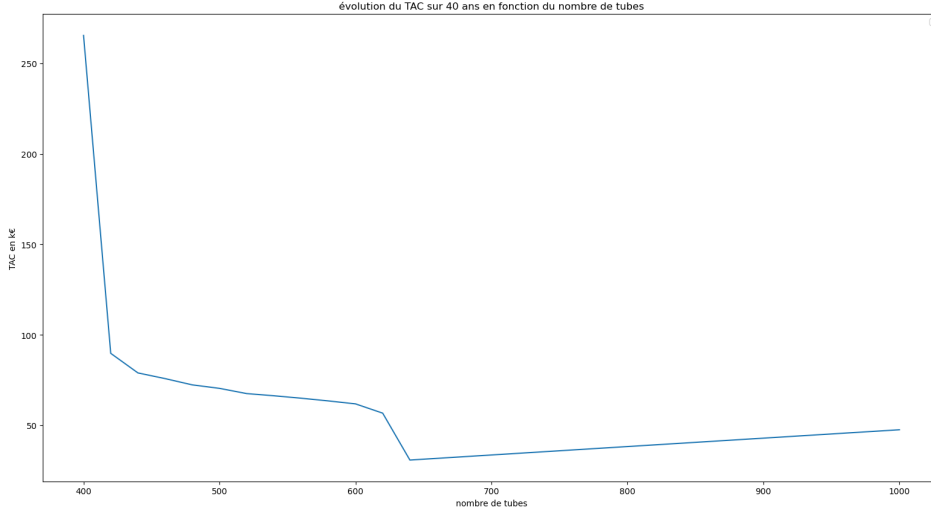


FIGURE 3.3 – évolution du  $TAC$  en fonction du nombre de tubes

La 3.3 montre l'évolution du TAC en fonction du nombre de tubes. Elle permet de prendre une décision sur le nombre de tubes que l'on veut dans l'échangeur. La partie de droite, très haute, est la zone où l'échangeur est sous dimensionné, et où c'est l'échangeur additionnel qui fonctionne.

Le plateau qui suit est la zone intéressante pour dimensionner un échangeur qui va être maintenu. Le TAC y est à peu près constant mais pas les OPEX et CAPEX : à gauche CAPEX bas et OPEX élevé ; à droite OPEX bas et CAPEX élevé.

La situation de la dernière partie de la courbe est celle où la maintenance n'est plus nécessaire (échangeur surdimensionné). Dans cette partie l'OPEX est constant et le CAPEX dépend du nombre de tubes

La solution d'un échangeur à maintenance a pour but de réduire le CAPEX au profit de l'OPEX, On se placera donc dans la zone gauche du plateau. Les figures suivantes sont tracées avec **500 tubes**.

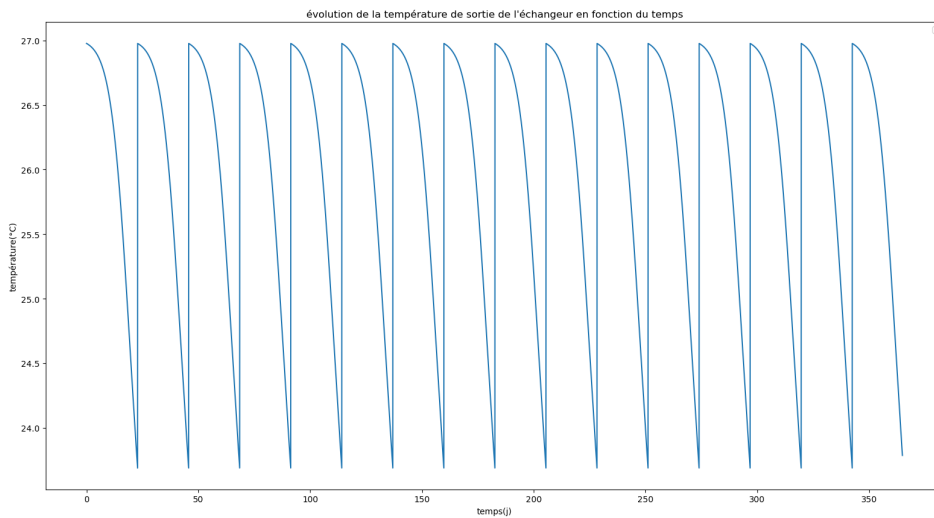


FIGURE 3.4 – évolution de la température  $T$  en fonction de temps

La température a une évolution périodique qui dépend des maintenances 3.26. La 3.5 illustre le remplacement de l'échangeur classique par l'échangeur additionnel à chaque fois que la puissance dissipée atteint 20MW.

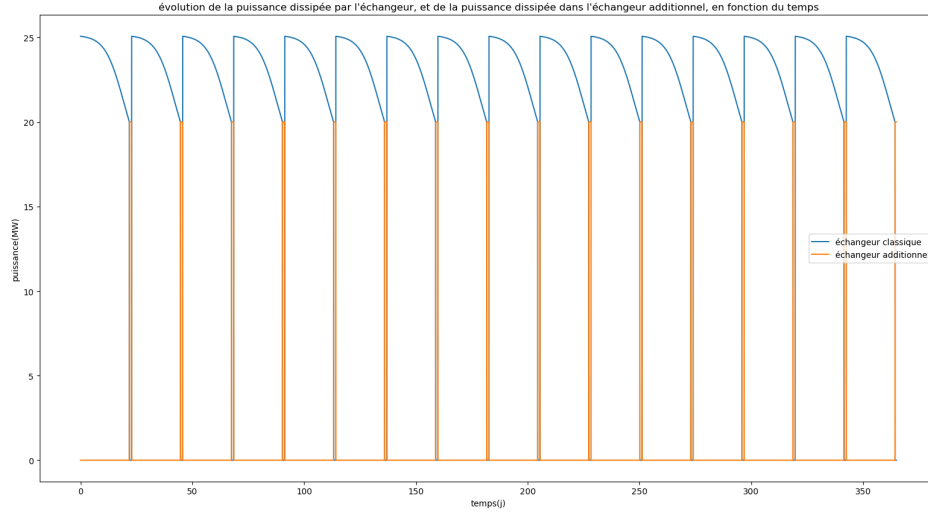


FIGURE 3.5 – évolution de la puissance thermique  $P_{th}$  dissipée par l'échangeur, et de la puissance dissipée par l'échangeur additionnel, en fonction du temps

### 3.4.3 Scénario 2 : Utilisation de biocides

Dans ce cas, un biocide est injecté tout au long de l'année. Le biocide a pour effet de limiter l'encrassement ( $e_{\infty}$  est divisé par 2) et d'augmenter la puissance limite dissipée au maximum d'encrassement [1].

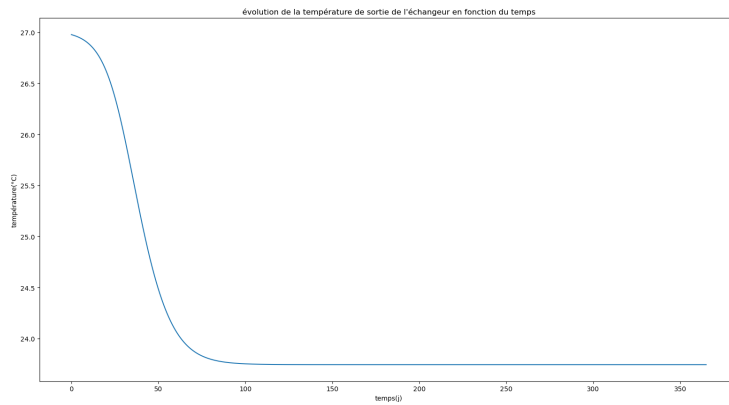


FIGURE 3.6 – Température  $T$  en fonction du temps (*mer, biocide*)

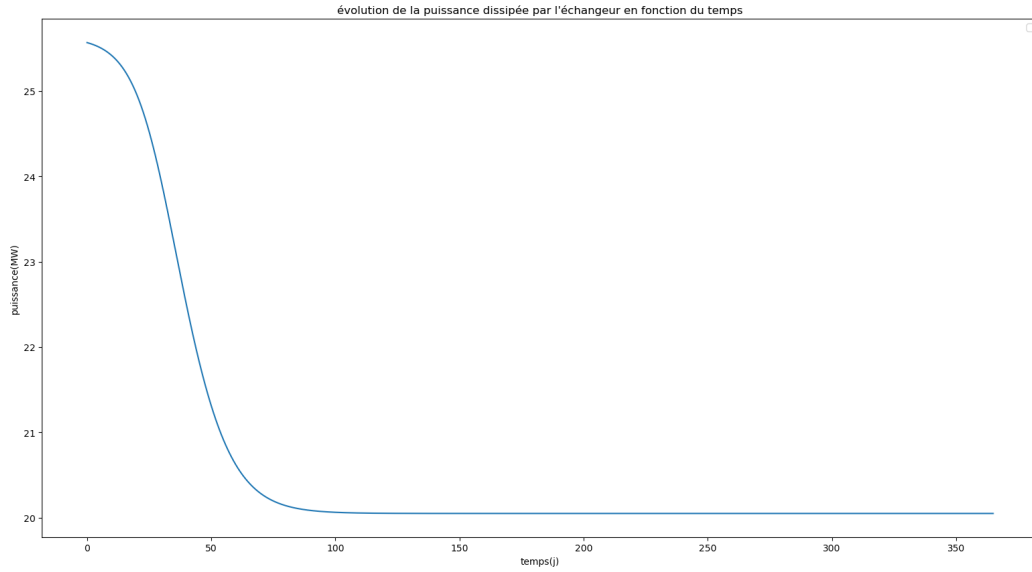


FIGURE 3.7 – Puissance thermique dissipée  $P_{th}$  en fonction du temps (*mer, biocide*)

#### 3.4.4 Scénario 3 : Encrassement total

Dans ce cas l'échangeur est surdimensionné de sorte à pouvoir dissiper **20 MW** lorsque les tuyaux sont complètement encrassés et lorsque l'épaisseur du biofilm est maximale. La maintenance ou l'utilisation de biocide sont alors inutiles pour la dissipation thermique. Les figures sont tracées pour un échangeur de **630 tubes**.

L'échangeur dissipe bien les **20MW**.

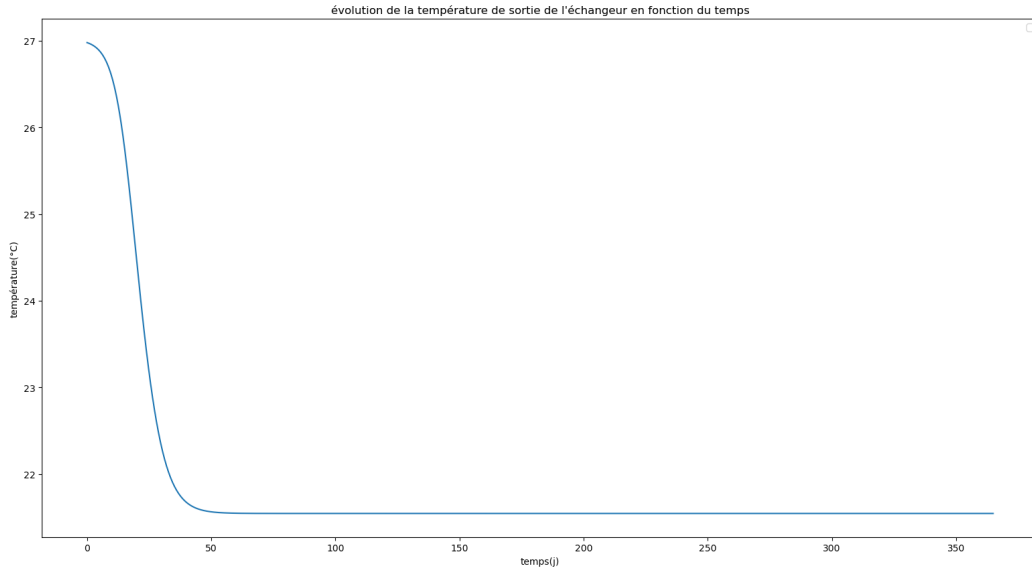


FIGURE 3.8 – Température  $T$  en fonction du temps (*mer, encrassement maximal*)

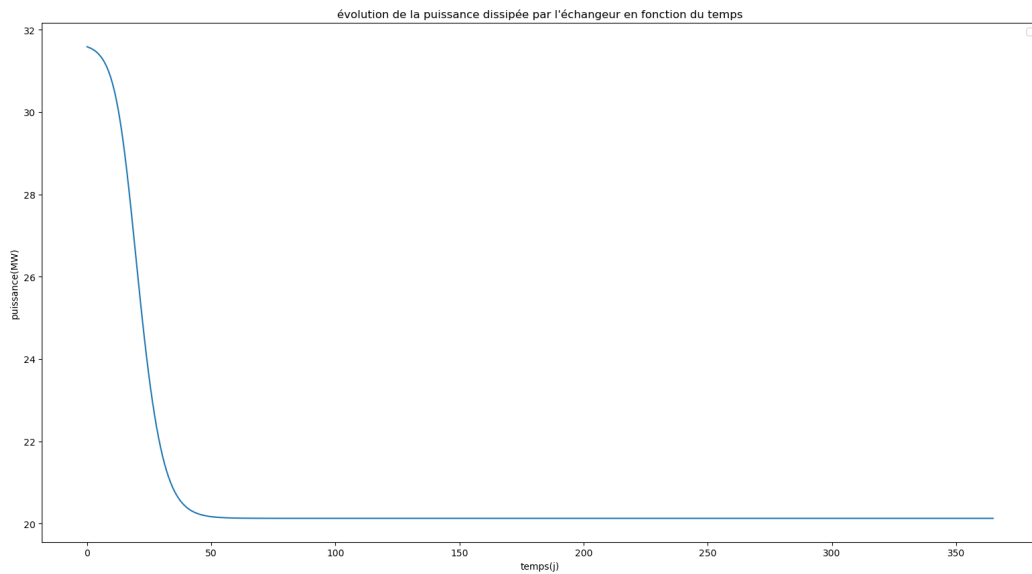


FIGURE 3.9 – Puissance thermique dissipée  $P_{th}$  en fonction du temps (*mer, encrassement maximal*)

## 3.5 Cas d'études 2 : en rivière

### 3.5.1 Scénario 0 : Fictif

Dans le cas idéal sans biofilm sur la figure 3.10, la température reste constante car il n'y a pas de résistance thermique imposé par le biofilm. De plus les échanges thermiques se font assez rapidement (de l'ordre de la seconde) si bien que le régime établi est obtenu de façon quasi instantanée, d'autant plus que l'étude est menée sur une échelle de temps de l'ordre de l'année.

Sur la figure 3.11 puissance thermique échangée reste constante car la température dans le tube ainsi que celle de la couche d'eau condensée sur les parois externes du tuyau métallique restent constantes.

Sur la figure 3.12, la température en sortie de l'échangeur est plus faible car dans le cas présent, la longueur des tuyaux (de 5m contre 10m pour les graphes précédents) est plus petite. Et donc l'eau passe moins de temps dans les tuyaux de l'échangeur, et donc absorbe moins de chaleur et s'échauffe moins.

Sur la figure 3.13 On a la même interprétation que précédemment mais avec une température en sortie de l'échangeur plus basse pour des tuyaux de 5m de long.

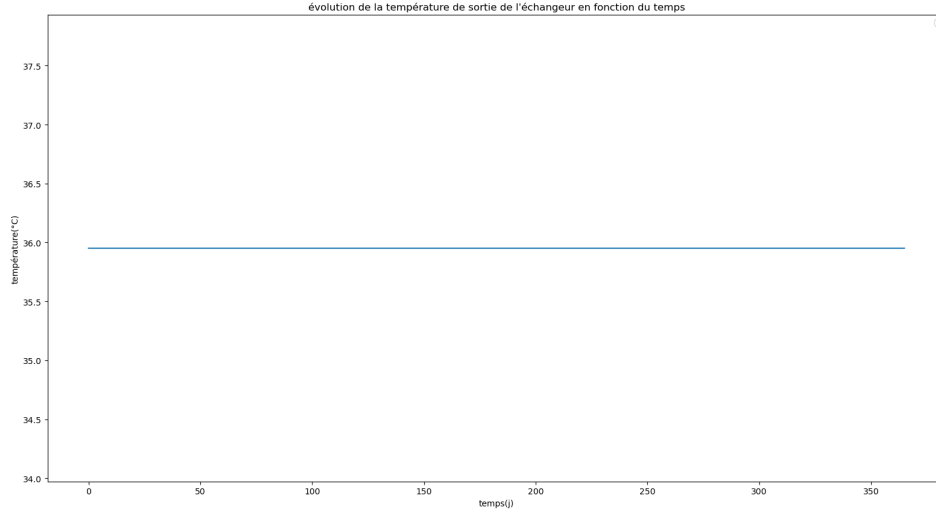


FIGURE 3.10 – évolution de la température en fonction du temps

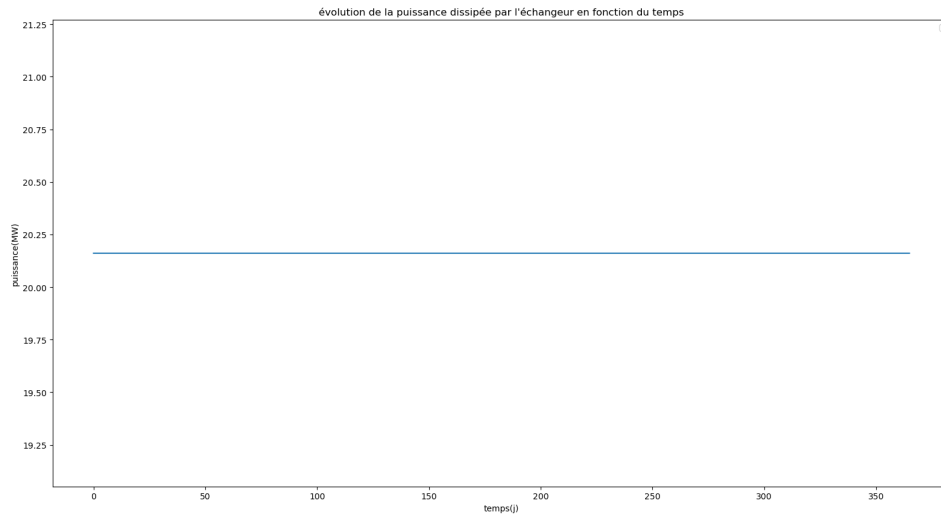


FIGURE 3.11 – évolution de la puissance en fonction du temps

### 3.5.2 Scénario 1 : Maintenance de l'échangeur

La situation est similaire à celle de l'eau de mer. L'échangeur principal est arrêté pendant 24h lorsque la puissance thermique dissipée passe en dessous du seuil de  $20MW$ , et il est remplacé par l'échangeur additionnel. La figure 3.14 montre l'évolution du  $TAC$  en fonction du nombre de tubes. C'est avant la légère rupture du  $TAC$  autour de 830 tubes qu'il est nécessaire d'arrêter l'échangeur principal pour maintenance. Puisque l'on cherche aussi à ne pas avoir un  $CAPEX$  trop élevé, on choisit un nombre de tubes qui n'est pas trop élevé et pour lequel le  $TAC$  est assez bas. On prend alors  $N_{tubes} = 600$ .

On se place ensuite dans une situation limite, où le choix de lancement des maintenances est le plus espacé possible, mais où la puissance dissipée est supérieure à  $20MW$ . On trouve ainsi pour valeurs des indicateurs économiques :  $TAC = 128k\text{€}$ ,  $CAPEX = 966k\text{€}$  et  $OPEX = 125k\text{€}$ .

Néanmoins, on remarque sur la figure 3.15 que la température de l'eau rejetée  $T_{rej}$  est supérieure à la valeur limite de  $30C$  imposée par la législation de [3]. Pour remédier à ce problème, on proposera une solution qui sort des consignes proposés par le client.

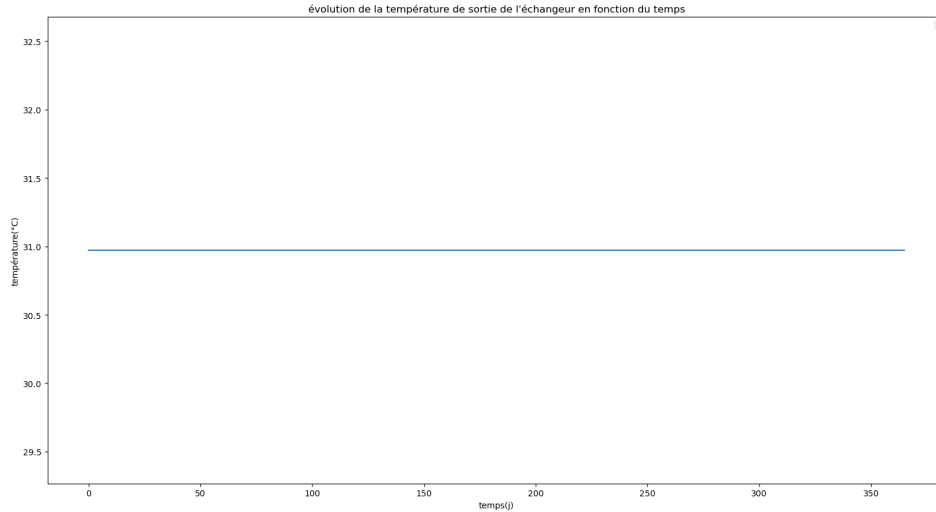


FIGURE 3.12 – évolution de la température en fonction du temps

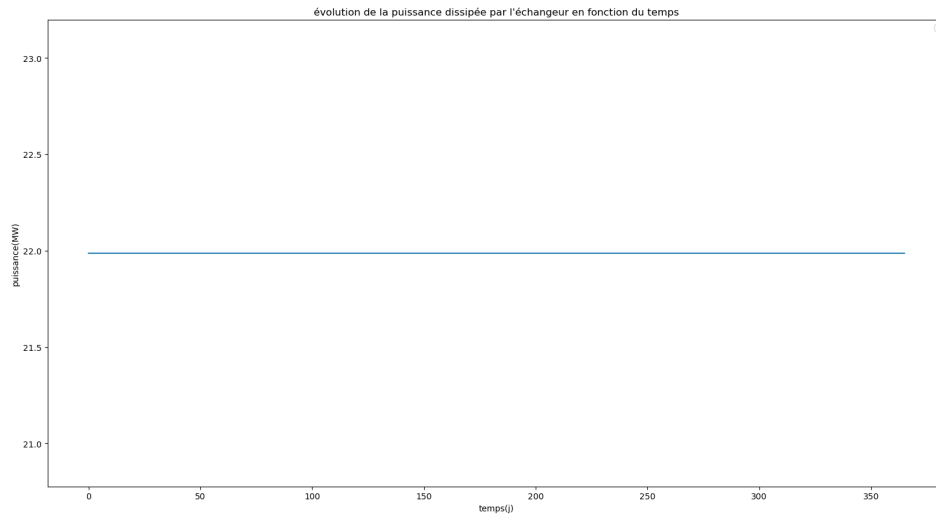


FIGURE 3.13 – évolution de la puissance en fonction du temps

### 3.5.3 Scénario 1 bis : Tubes plus courts

Afin de réduire la température de l'eau rejetée, on propose de réduire la taille des tubes, pour  $L = 5m$ , tout en respectant le critère d'évacuation de chaleur à  $20MW$ , visible sur la figure 3.19. D'après la figure 3.17, on en déduit le nombre de tubes :  $N_{tubes} = 1100tubes$ . Ainsi, la température de l'eau rejetée est comprise entre  $30C$  et  $31C$ , comme visible sur la figure 3.18. On reste au dessus de la température maximale de  $30C$ , mais l'écart avec cette valeur est beaucoup plus faible et on peut imaginer des méthodes de refroidissement de cette eau par prélèvement à la rivière pour mélanger les deux eaux et "diluer" la température.

Les indicateurs économiques obtenus pour ce scénario sont :  $TAC = 115k€$ ,  $CAPEX = 917k€$  et  $OPEX = 112k€$ .



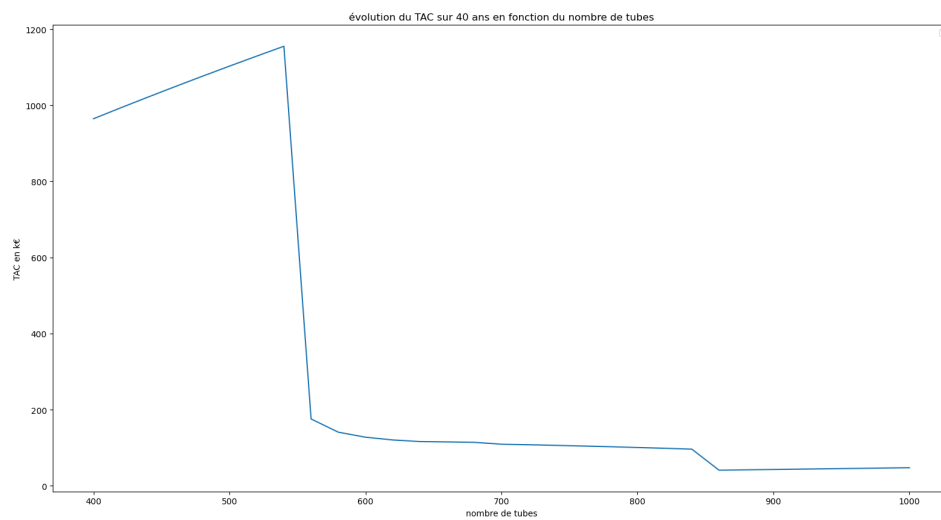


FIGURE 3.14 – évolution du  $TAC$  en fonction du nombre de tubes

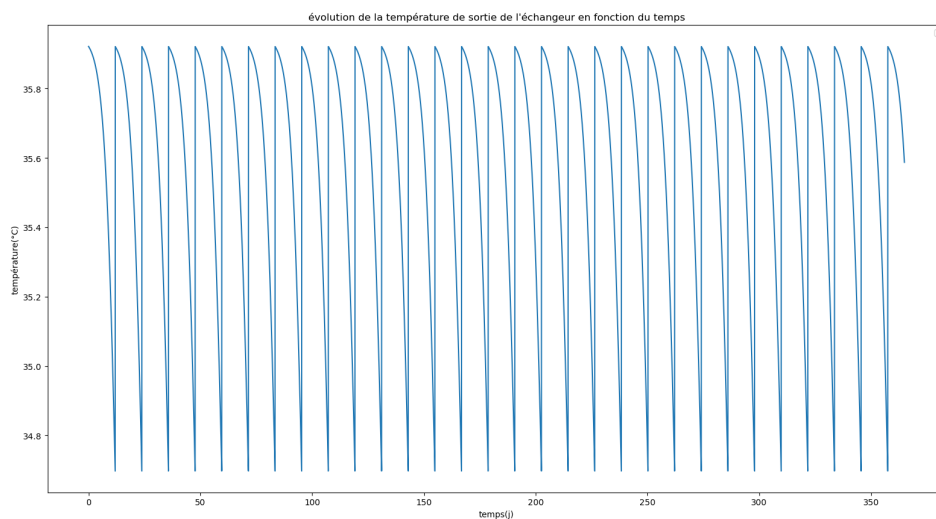


FIGURE 3.15 – évolution de la température  $T$  en fonction de temps

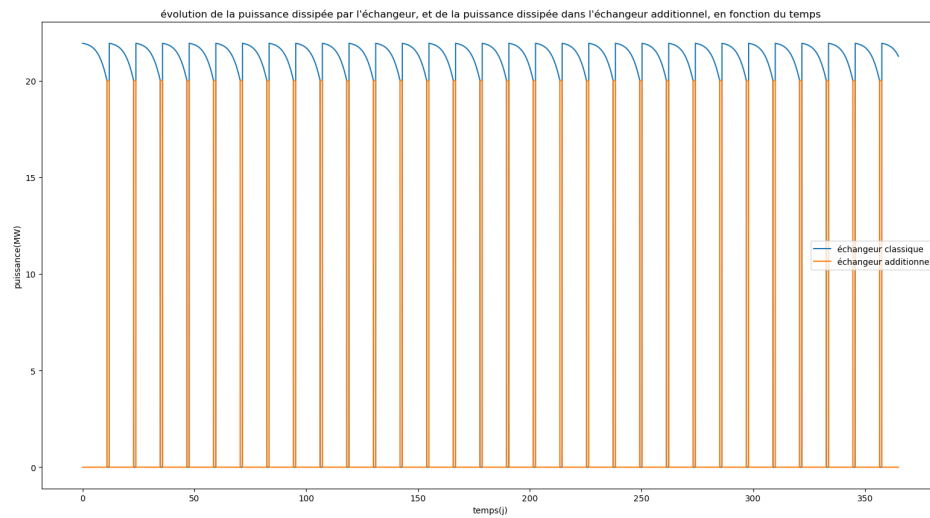


FIGURE 3.16 – évolution de la puissance thermique  $P_{th}$  dissipée par l'échangeur, et de la puissance dissipée par l'échangeur additionnel, en fonction du temps

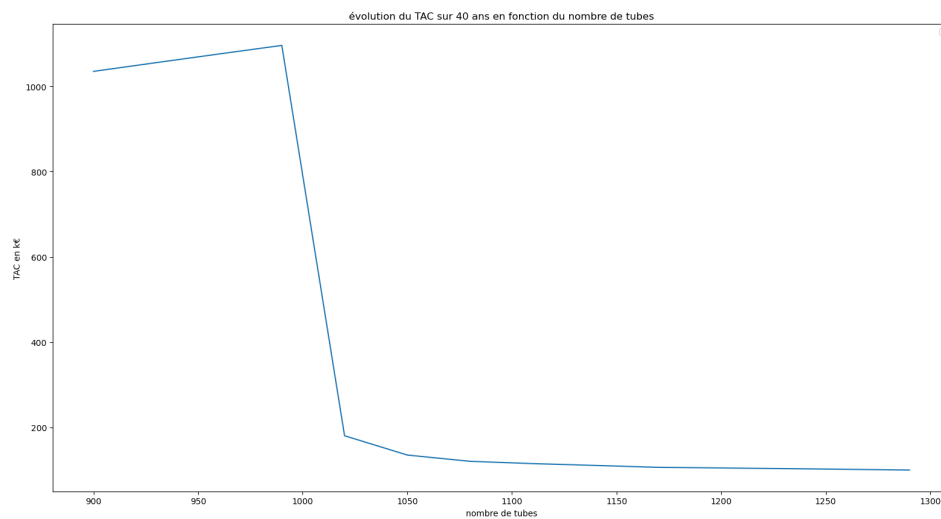


FIGURE 3.17 – évolution du  $TAC$  en fonction du nombre de tubes

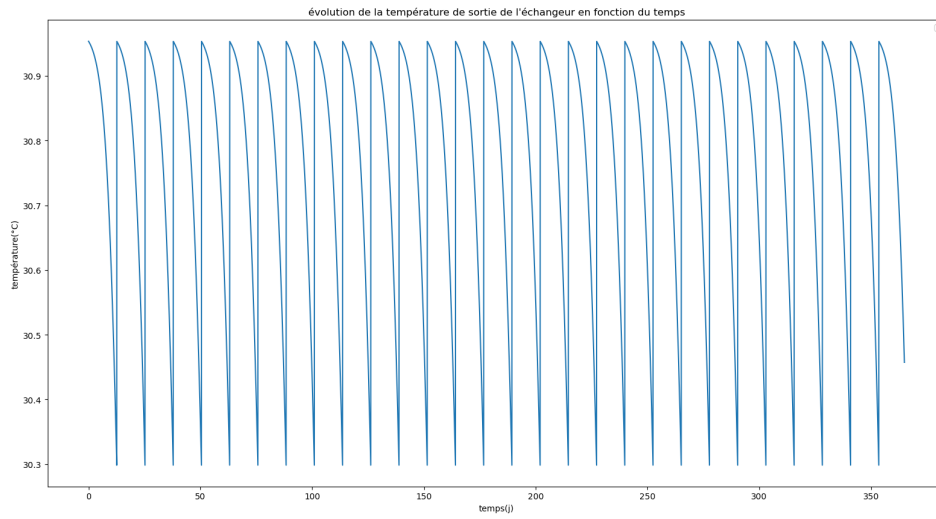


FIGURE 3.18 – évolution de la température  $T$  en fonction de temps

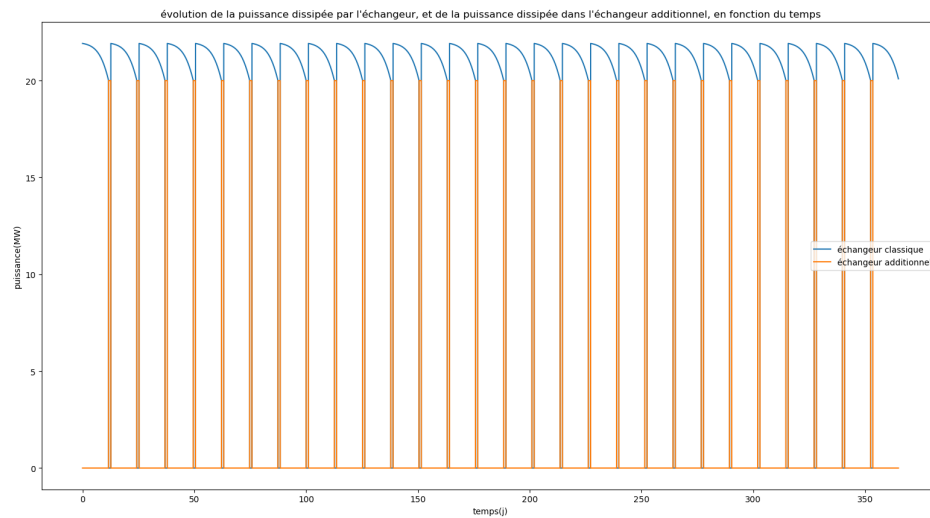


FIGURE 3.19 – évolution de la puissance thermique  $P_{th}$  dissipée par l'échangeur, et de la puissance dissipée par l'échangeur additionnel, en fonction du temps

### 3.5.4 Scénario 2 : Utilisation de biocides

Il s'agit du même scénario que dans cas mer scénario 2, mais avec les conditions de la rivière : température d'entrée 25°C. On trace les courbes avec **700 tubes**.

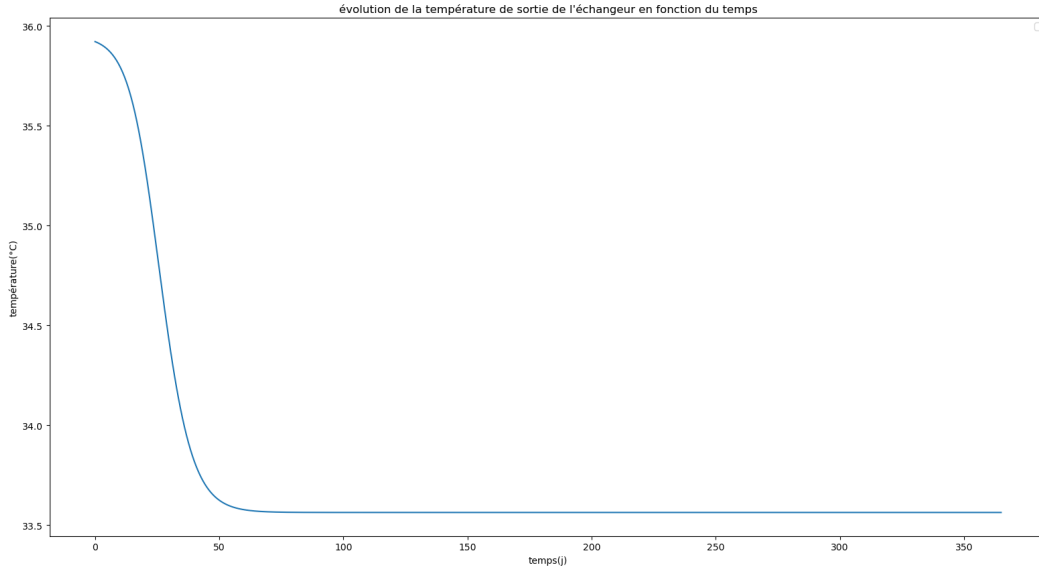


FIGURE 3.20 – Température  $T$  en fonction du temps (*rivière, biocide*)

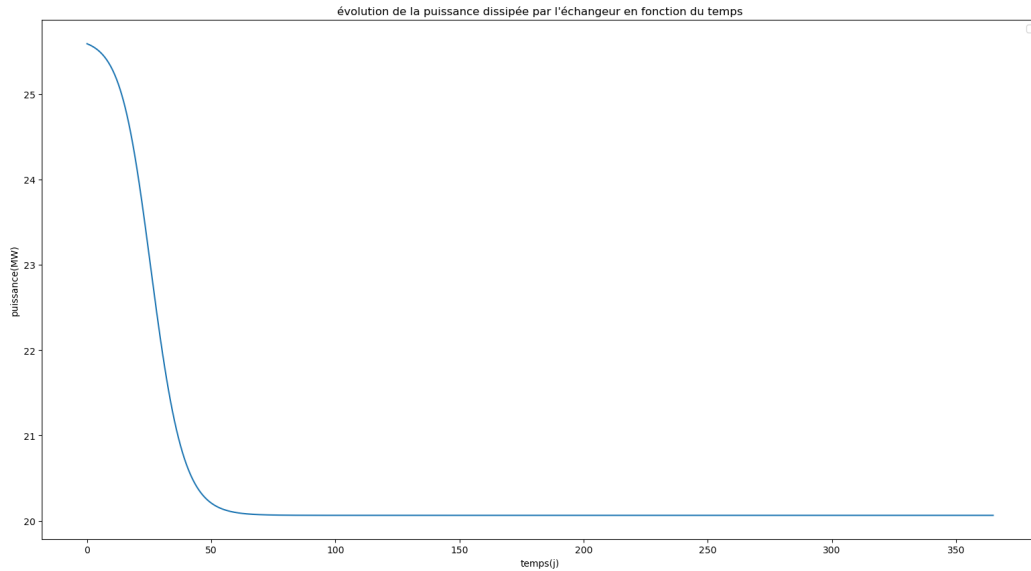


FIGURE 3.21 – Puissance thermique dissipée  $P_{th}$  en fonction du temps (*rivière, biocide*)

Les 20MW sont bien dissipés, mais à quel prix ? La température est excessive. Nous sortons donc du cadre imposé pour essayer les tubes de 5m. Les figures suivantes sont tracées pour des tubes de 5m au nombre de 1310.

La puissance imposée de 20MW est toujours bien dissipée 3.23, et cette fois la température sort du cadre réglementaire uniquement sur une période de 40 jours 3.22. Cette solution peut probablement être mise en place à condition que de l'eau soit prélevée en plus pour diluer l'eau chaude pendant ce régime transitoire. Sinon, puisque la simulation est réalisée au pire, ie pour une température de 25°C en été, Il est sans doute possible de lancer la centrale à d'autres moments plus froids de l'année. Une étude complémentaire est nécessaire pour étudier la faisabilité de la mise en place de telles solutions, notamment dans un contexte de réchauffement climatique ou la température des cours d'eau est vouée à augmenter.

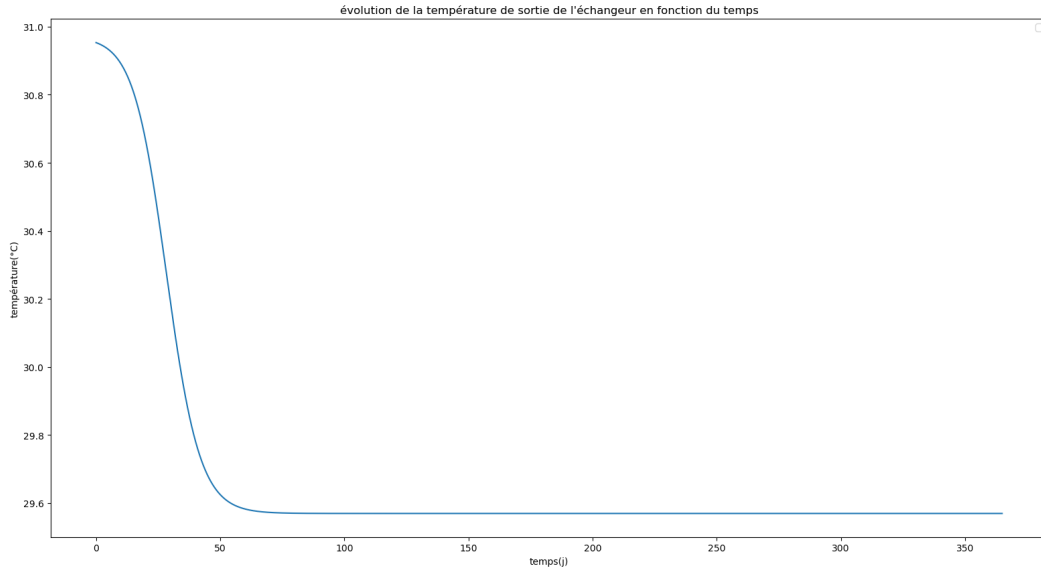


FIGURE 3.22 – Température  $T$  en fonction du temps (*mer, biocide*)

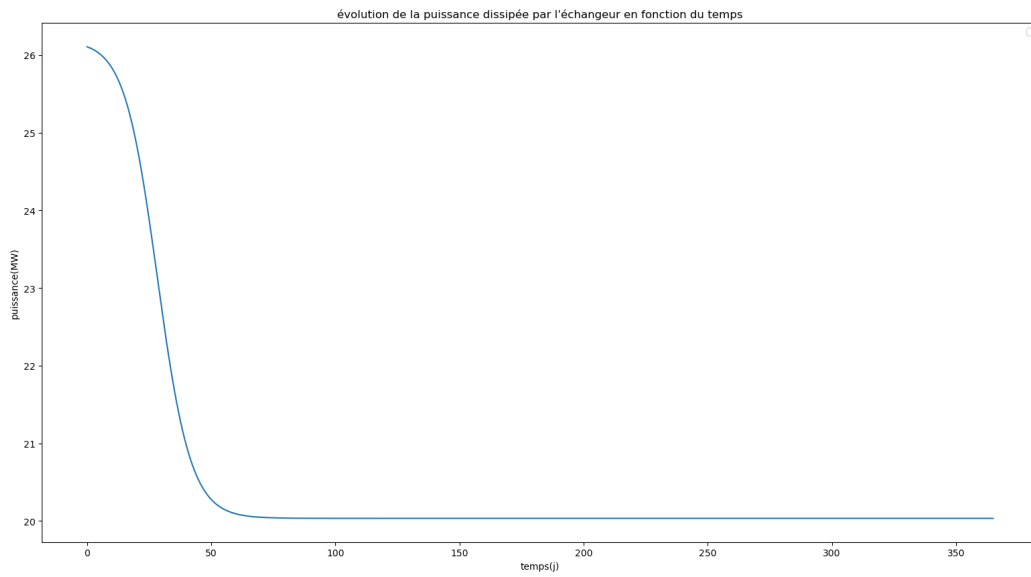


FIGURE 3.23 – Puissance thermique dissipée  $P_{th}$  en fonction du temps (*mer, biocide*)

### 3.5.5 Scénario 3 : Encrassement total

Il s'agit du même scénario que dans le cas "mer", mais avec de l'eau de rivière. Les 20MW sont dissipés, mais la température de rejet  $T_{rej}$  est excessive. Les figures sont tracés avec  $N = 860tubes$ .

On prend maintenant des tubes plus courts de longueur  $L = 5m$ , au nombre de  $N = 1640tubes$ . Les 20MW sont bien dissipés, la température de rejet est trop grande par rapport aux réglementations [3], mais seulement durant les 30 premiers jours. (situation similaire au scénario 2bis)

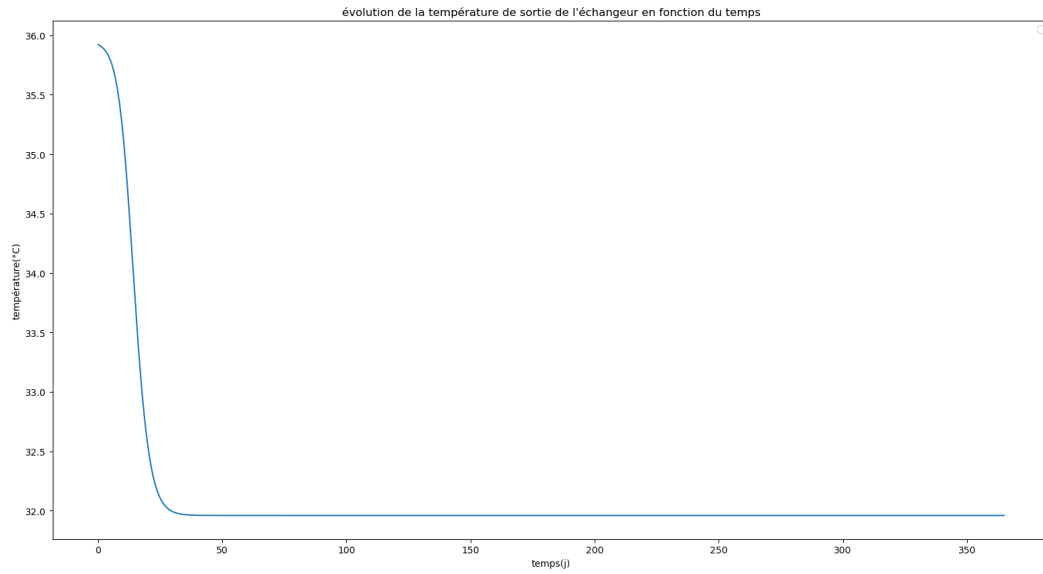


FIGURE 3.24 – Température  $T$  en fonction du temps (*rivière, encrassement maximal*)

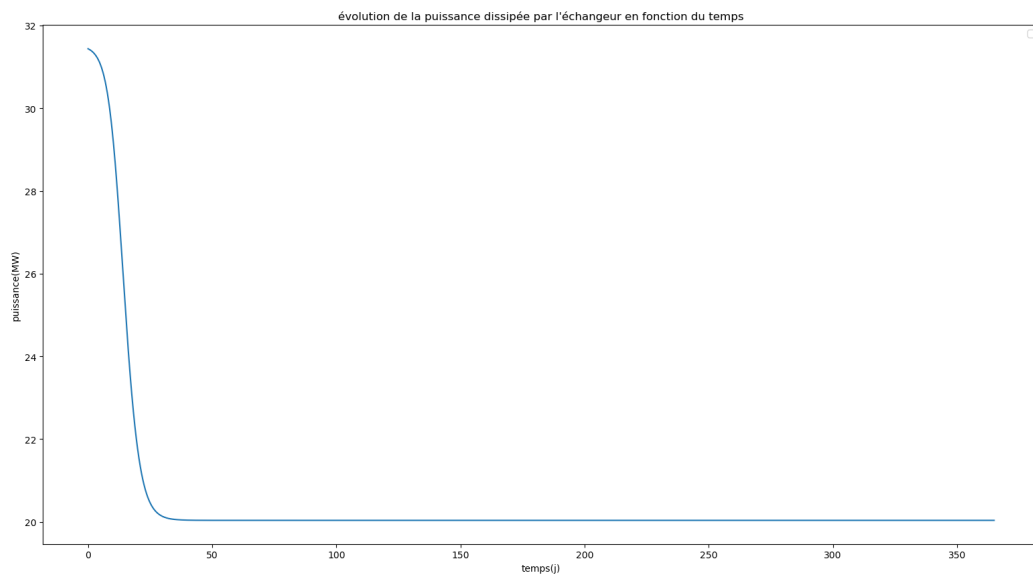


FIGURE 3.25 – Puissance thermique dissipée  $P_{th}$  en fonction du temps (*rivière, encrassement maximal*)

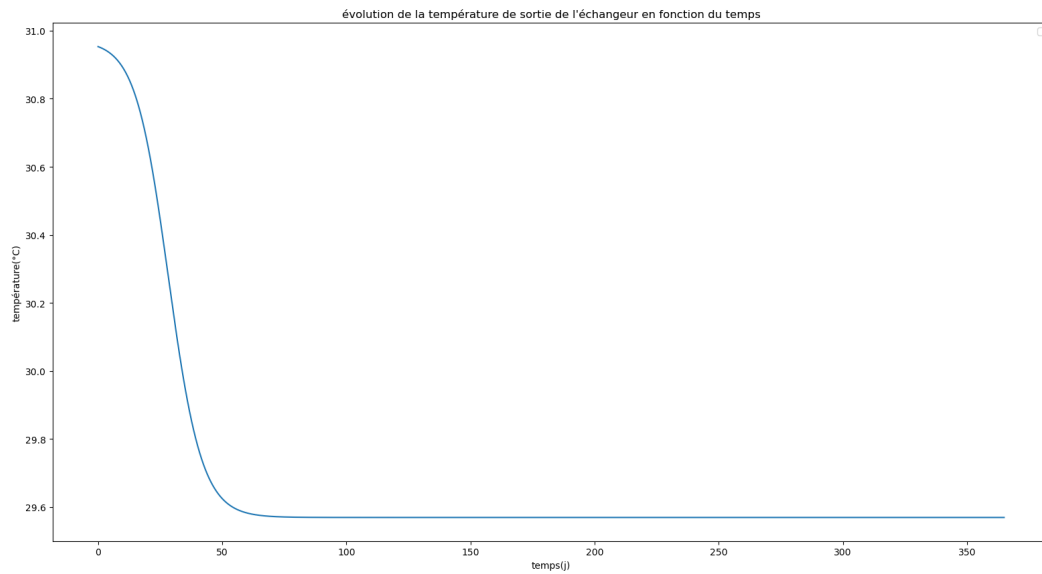


FIGURE 3.26 – Température  $T$  en fonction du temps (*rivière, encrassement maximal*)

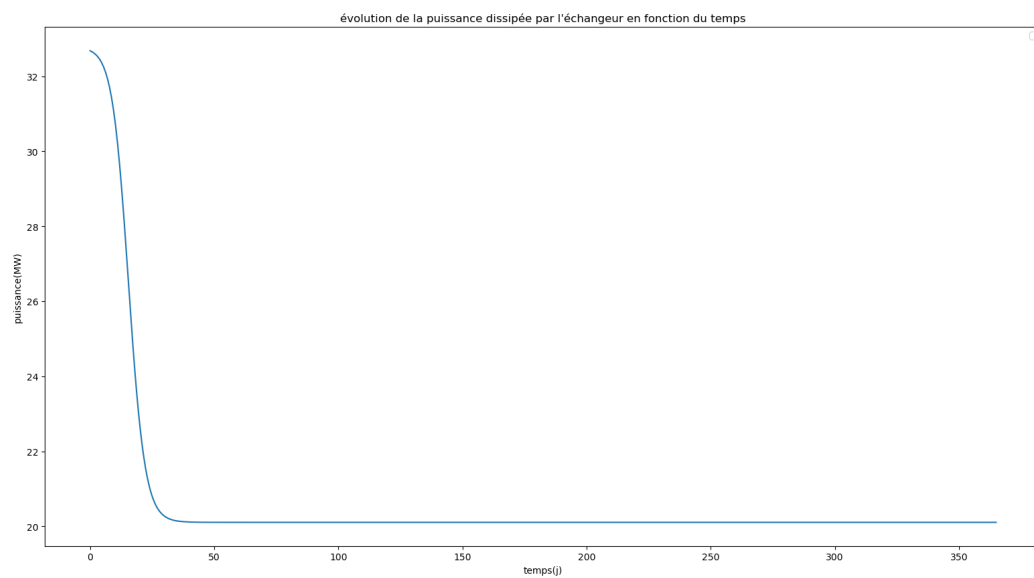


FIGURE 3.27 – Puissance thermique dissipée  $P_{th}$  en fonction du temps (*rivière, encrassement maximal*)

### 3.6 Étude des KPI

	Scénario 1 (maintenance)		Scénario 2 (biocide)		Scénario 3 (encrassé)	
	Mer	Rivière	Mer	Rivière	Mer	Rivière
TAC <sub>[€/an]</sub>						
CAPEX <sub>[€]</sub>						
OPEX <sub>[€/an]</sub>						
Température						
Pathogène						
Biocide			27			

Au vu du tableau ci-dessus, il est possible de conclure sur les solutions à privilégier.

Dans le cas de l'eau de mer, deux solutions (maintenance et encrassement total) peuvent être retenues. Ces solutions respectent les critères environnementaux et de température. Il s'agit donc de savoir si on souhaite privilégier un OPEX ou CAPEX important. Du point de vue du client, il semble plus avantageux d'avoir des coûts d'utilisation plutôt qu'un gros investissement en amont du projet. On privilégiera la solution avec le scénario incluant la maintenance.

Dans le cas de l'eau de rivière, la solution où les tubes sont entièrement encrassés et la solution avec les maintenances sont inenvisageables sanitaires. La solution à retenir est donc celle incluant l'utilisation de biocide.



# Conclusion

## Conclusion sur les résultats proposés

Le modèle étudié présente quelques limites. Il ne tient pas compte du type de microbiologie présente dans l'eau. Il a été ajusté par rapport aux valeurs expérimentales de Nebot, réalisées sur une mer. Cependant, le modèle étudié est utilisé pour faire des simulations sur des eaux de rivière. Néanmoins, il reste assez fiable car il permet d'avoir un ordre de grandeur assez précis des valeurs de températures, d'épaisseur de biofilm, mais aussi du dimensionnement de l'échangeur.

## Perspectives

### Ecologie

Il peut être intéressant de faire une étude plus poussée de l'activité biologique de l'eau prélevée. Cela permettrait de savoir si le biofilm est susceptible de se développer au delà de l'épaisseur maximale prévue par notre modèle. Dans ce cas, il faudrait adapter le dimensionnement de l'échangeur.

### Echangeur

Lors du dimensionnement, pour diminuer davantage les températures en sortie de l'échangeur notamment en été, et respecter les réglementations, il peut être envisagé d'augmenter le débit d'eau (le doubler par exemple), tout en réduisant la longueur des tuyaux de l'échangeur. Ceci va permettre de diminuer considérablement le temps passé par les eaux de refroidissements dans le tuyaux, en réduisant les échanges thermiques et ainsi la température de l'eau en sortie de l'échangeur.

### Fonctionnement de la centrale nucléaire

Au début de la mise en marche de la centrale, il n'y a pas de biofilm. Les échanges thermiques sont les plus importants et la température en sortie est maximale. Ceci peut devenir critique en été lorsque la température de l'eau prélevée est supérieure à 25°C. La température de l'eau rejetée serait trop importante. En régime permanent, la résistance de la couche de biofilm limite les échanges thermiques, et donc l'élévation de température. Il peut être judicieux de démarrer la centrale l'hiver (lorsque la température de l'eau en entrée est la plus froide). Le régime permanent sera alors établi au bout de 60 jours (avant la période estivale). Lorsque l'eau sera alors plus chaude en été, l'élévation de température sera moindre et les réglementations seront respectées.

## Règlementation

Les perspectives présentées ci-dessous doivent être explorées en tenant compte de la demande énergétique plus importante en hiver et des diverses réglementations (débit maximale de prélèvement d'eau autorisé, température maximale de l'eau en sortie, ...).

# Annexes

## Annexe 1 : fiche objectif

Objectif du travail demandé	Proposer des solutions aux problèmes de perte d'efficacité énergétique du refroidissement des circuits ouverts engendrés par le biofouling, à partir d'un modèle simple que l'on aura dressé, et arbitrer ces solutions en prenant en compte l'efficacité énergétique, les facteurs économiques, environnementaux et sanitaires.
Livrables attendus	<p><b>-Rapport technique.</b> Il présente le problème, les enjeux et les solutions existantes. Il propose une modélisation du système étudié et fait son analyse. Il propose des solutions et fait leur analyse et leur comparaison. Il conclue sur la meilleure solution envisagée, ses coûts et ses impacts.</p> <p><b>-Présentation expert.</b> Elle doit contenir le modèle, ses hypothèses et ses propriétés, comment il permet de prédire le comportement du système. Elle doit contenir l'exploitation du modèle pour tester les solutions, les résultats de simulations. Elle montre la validité du modèle envisagé et le fondement des solutions proposées.</p> <p><b>-Présentation client.</b> Elle doit intégrer les résultats des simulations et ses conclusions sans trop s'attarder sur la modélisation. Elle doit donner de façon clair et crédible les avantages et les inconvénients des solutions étudiées et présenter leurs coûts et impacts.</p> <p><b>-Simulateur python.</b> Il doit permettre de simuler le modèle suivant différents paramètres du système et différents scénarii.</p>
Quel est le fond du problème et quelles sont ses causes ?	<p>-Le fond du problème est la perte d'efficacité énergétique liée au développement d'un biofilm sur les parois des tubes d'échangeur thermique du réseau tertiaire.</p> <p>-A l'échelle microscopique, des colonies de microorganismes se développent (milieu chaud et humide idéal au développement de microorganismes). A l'échelle des tubes de l'échangeur, on observe une augmentation de la résistance thermique de la paroi. Au niveau de l'échangeur, la vapeur d'eau sort à une température plus chaude. A l'échelle de la centrale, ceci engendre une diminution significative de la production d'électricité.</p> <p>-Les conséquences pour l'entreprise sont donc principalement les pertes économiques. Il existe pour autant des enjeux sanitaires (prolifération d'agents pathogène : légionnelle et amibe) et des enjeux environnementaux (impact sur la biodiversité) importants.</p>
A quelle ambition (finalité) plus générale ce travail peut-il contribuer ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Améliorer l'efficacité de la production énergétique des centrales nucléaires.</li> <li>• Faire diminuer le coût de production d'électricité.</li> <li>• Encourager l'adoption de ce système de refroidissement dans les centrales nucléaires présentes et futur à l'échelle mondiale et réduire l'utilisation des centrales fossiles et donc des émissions de CO2 et prévenir du changement climatique.</li> <li>• Protéger l'environnement, enjeu sanitaire.</li> <li>• Le procédé se place dans le contexte de l'efficacité énergétique, d'énergie durable et de souveraineté énergétique.</li> </ul>

FIGURE 3.28 – Fiche Objectif

## Annexe 2

### Calculs économiques, indicateurs et formules

*CAPEX* : *capital expenditure* , couts liés aux investissements avant le lancement de la centrale.  
Dans notre cas, le *CAPEX* correspond à l'investissement lié à la construction de tubes d'échangeur. On a ainsi la formule suivante :  $CAPEX = 20234 * S_{tot}^{0.61}$ , avec  $S_{tot}$  la surface totale d'échange des échangeurs.

*OPEX* : *operating expenses*, couts d'exploitation et de maintenance de la centrale.

Pour les couts liés aux *OPEX* il faut prendre en compte :

-les couts liés à l'achat de biocide, dont les tarifs sont : 1000 *euro la tonne*

-cout de l'électricité : 130 *euros par MWh d' electricit consomme*

-cout d'utilisation d'un système de refroidissement supplémentaire : 0.35 *euro par Giga.Joules*

-cout de nettoyage complet :  $75 * S_{tot}^{0.6}$  euro pour 24h

*TAC* : *total annual cost*, indicateur économique privilégié lors de notre étude :  $TAC = CAPEX + f_a * OPEX$

$f_a$  : facteur d'actualisation des capitaux, dépendant de la durée de vie et du taux d'actualisation du projet. Ici :

$f_a = 0,094an^{-1}$

# Bibliographie

- [1] José F. Casanueva Enrique Nebot Cristina López-Galindo. Efficacy of different antifouling treatments for seawater cooling systems. *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 2010.
- [2] T. Casanueva D. Sales E. Nebot, J.F. Casanueva. Model for fouling deposition on power plant steam condensers cooled with seawater : Effect of water velocity and tube material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007.
- [3] Christian Chevalier Jean-Luc Colin et Michel Khalanski Philippe Hartmann, François Bordet. Centrales nucléaires et environnement. 2020.